

文章编号: 0258-7106(2008)03-0407-08

了墩隆起西缘地浸砂岩铀矿成矿水动力条件的遥感处理与分析*

刘蓉蓉¹ 林子瑜²

(1 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 东华理工大学, 江西 抚州 344000)

摘要 鉴于吐哈盆地地表植被覆盖稀少, 故利用遥感技术提取亮度、绿度、湿度指数并加以合成, 以反映盆地及其周边的反射蒸腾强度、植被覆盖程度和土壤湿度的信息, 显示出盆地排泄构造的空间展布特征, 进而分析成矿期间研究区的水动力环境, 并划分出主要补给区(觉罗塔格山、天山山脉)和排泄区(鲁克沁附近及位于两者之间的径流区)。利用吐哈盆地现代三维地形图, 结合盆地常规地质研究成果, 反演成矿期间研究区及其周围地形高差特点, 揭示出了墩隆起和西缘艾丁湖斜坡带的长期存在, 以及它们影响了盆地的水动力系统, 提供了南高北低长径流范围的成矿地形优势。

关键词 地质学; 地浸砂岩铀矿; 水动力条件; 遥感; 了墩隆起

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Remote sensing extraction and analysis of metallogenic hydrodynamic conditions of in-situ leachable sandstone-type uranium deposit on western margin of Liaodun uplift

LIU RongRong¹ and LIN ZiYu²

(1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

2 East China University of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China)

Abstract

In view of rare vegetation in Turpan-Hami basin, the authors utilized the remote sensing technique to extract and combine brightness, greenness and wetness indices. The results can reflect the transpiration intensity, vegetation degree and soil moisture as well as spatial distribution of drainage patterns. Through an analysis of the metallogenic hydrodynamic conditions of the study area, three districts were distinguished, i. e., supply district, runoff district and drainage district. Inversion of the relief features of the study area was conducted by using modern 3D chorography in combination with geological research results obtained from the basin, which revealed the long existence of the Liaodun uplift and the western marginal slope zone that has affected the hydrodynamic condition and provided the relief advantage of long runoff high in the south and low in the north.

Key words: geology, in-situ leachable sandstone-type uranium deposit, hydrodynamic condition, remote sensing, Liaodun uplift

* 本文受到国家重点基础研究发展规划(973项目)(2001 CB40988)资助

第一作者简介: 刘蓉蓉, 女, 1980年生, 博士生, 矿产普查与勘探专业, 从事矿床地质方向研究。

收稿日期: 2007-09-24; 改回日期: 2008-01-23。张绮玲编辑。

地浸砂岩铀矿是一种产于可渗滤砂岩层体中、经济可采的沉积矿床,是当今国际铀资源勘探中最重要的铀矿类型之一。由于该类矿床多产于辽阔的荒漠戈壁区,自然生态环境比较恶劣,加之产出部位在地表多被严重覆盖,因而地面常规地质调查往往难以深入和全面展开。所以,如何巧破盖层,寻找一种经济、快速和高效的找矿方法以提高找矿效益和预测精度,是当前急需解决的。

在过去的30~40年内,遥感迅速发展成为一门综合性的应用技术,它极大地增强了人类在区域乃至全球尺度上开发资源和监测环境的能力。在以往的铀矿地质研究中,遥感信息就被大量使用,如刘德长等(1989)利用地学信息与数字图像的综合技术,进行了火成岩区铀成矿预测的试验研究,并取得了明显的效果;黄贤芳等(1994)利用微弱信息处理技术,研究了伊犁盆地砂岩铀矿的成矿远景;何建国等(2000)利用光-能谱融合图像研究了花岗岩区铀矿田的控矿因素。

20世纪80年代后期,中国核工业地质系统实施战略重点转移,由原来在南方寻找火山岩型、花岗岩型铀矿为主,转向到西北地区寻找可地浸的砂岩型铀矿。地质工作者们通过开展对新疆吐哈盆地铀资源的成矿预测评价,提出了盆地具备形成地浸砂岩铀矿的良好前景。目前,在盆地西南缘十红滩一带已经探明了一定储量的可地浸砂岩型铀矿资源,但下一步勘查的方向何去何从,是一个值得思考、需要解决的问题。对十红滩地区地质勘查资料的分析 and 野外调查表明:铀矿赋存部位与一套横向入湖的三角洲砂体有关,铀源来自南部的觉罗塔格山脉,因此,可借助寻找类似的成矿环境作为切入点来部署找矿工作。

文章在“吐哈盆地地浸砂岩铀矿成矿规律研究”(973项目之专题)的基础上,利用遥感技术中的K-T变换提取了亮度(brightness)、绿度(greenness)和湿度(wetness)指数并加以合成,以反映盆地及其周边的反射蒸腾强度、植被覆盖程度和土壤湿度的信息;通过高绿度、湿度异常带,进而观察盆内排泄构造的空间展布特征,分析成矿期研究区的水动力环境,划分出其蚀源补给区、径流区和排泄区的范围。同时,利用吐哈盆地现代三维地形图,结合盆地地质研究成果,反演出成矿期间研究区及其周围的地形高差特点,揭示出了墩隆起和西缘艾丁湖斜坡带影响了盆地的水动力系统,提供了南高北低长径流范围的

成矿地形优势。通过对了墩隆起西缘水动力条件的遥感处理与分析,为铀成矿规律的研究提供了必要的成矿要素,也为铀矿勘查区的选择、找矿远景的扩大提供了重要的遥感判据。

1 地质概况

吐哈盆地的构造单元划分主要是依据盆地充填时的古地理、古构造以及沉积过程中及沉积后的构造变形来划分的。现今盆地内部的基本构造格局在一定程度上沿袭了盆地基底的构造面貌,古老地块的构造变形对盆地的沉积、变形都有明显的影响。综合分析已有的地质、物探等资料,可将盆地分为两坳一隆3个一级构造单元,并在此基础上又分为6个二级构造单元(袁明生等,2002)(图1)。其中吐鲁番坳陷、了墩隆起、哈密坳陷为一级构造单元。而研究区就处在吐哈盆地中西部、了墩隆起西缘,位于台北凹陷东南部与艾丁湖斜坡2个次级构造单元之内。

吐哈盆地是个多阶段演化的复式盆地,沉积盖层自下而上主要由上二叠统、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系地层组成。其中上二叠统一三叠系为河湖相暗色碎屑建造层,侏罗系为河湖相、沼泽相的暗色碎屑岩含煤建造层,白垩系—第四系为河湖相杂色碎屑岩建造,且各结构层之间均呈不整合接触。目前,通过野外调查和对前人资料的系统整理分析,已确定出盆地中-下侏罗统的水西沟群(八道湾组、三工河组、西山窑组)为成矿主要目的层(王保群,2000)。

“了墩隆起”是位于吐哈盆地中部,呈倒“T”型展布的正向一级构造单元。据盆地构造演化与沉积相的平面展布,该隆起西缘的主要成矿层位水西沟群,沿鄯善-小草湖形成一系列利于地浸砂岩铀矿富集的扇三角洲相、冲积扇相等沉积岩石组合。由于隆起的长期存在性,以其为纽带又连接着主要由晚古生代火山岩、火山碎屑岩及海西期花岗岩组成的铀、钍、钾特高场区——天山山脉,在盆地的铀成矿阶段,后者作为剥蚀区域可提供丰富的铀源补给。

2 遥感数据的预处理

2.1 数据源

本次研究主要是在遥感图像处理软件 Erdas Imagine 8.4 与地理信息系统软件 Arcview 3.0 的支

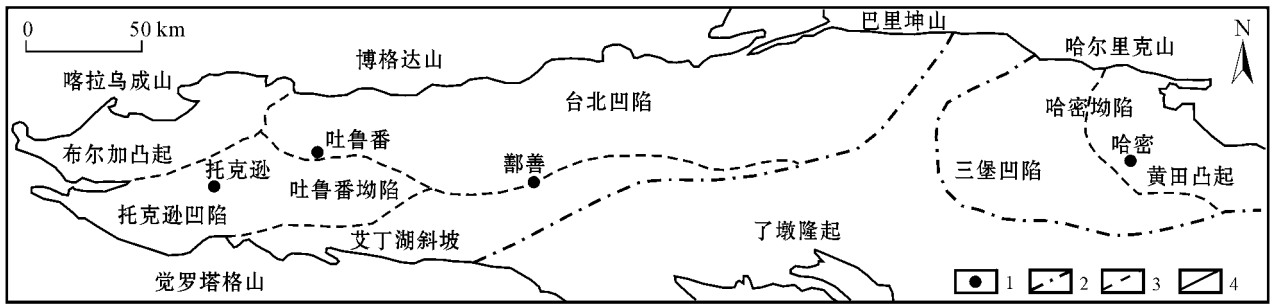


图1 吐哈盆地构造单元划分图(据袁明生等 2002)

1—地区;2—一级构造单元边界;3—二级构造单元边界;4—盆地边界

Fig. 1 Division of tectonic elements in Turpan-Hami basin (after Yuan et al., 2002)

1—Area; 2—Boundary of 1st-order tectonic unit; 3—Boundary of 2nd-order tectonic unit; 4—Boundary of basin

持下完成的。选用了与研究范围相关的6景 Landsat7号(美国陆地资源卫星)ETM吐哈盆地遥感图像数据(已经过几何校正):ETM139-30(2001, 9, 24), ETM139-31(2001, 10, 26), ETM140-30(2000, 7, 10), ETM140-31(2000, 7, 10), ETM141-30(1999, 9, 1), ETM142-30(1999, 8, 23), 进行处理解释。

2.2 数据的预处理

由于时间差异,太阳光强及大气状态的变化,致使获取的不同景的图像上的对比度及亮度值会有差异,因而对研究区所处的6景ETM遥感图像进行了大气辐射校正与辐射匹配预处理。同时,为了降低样本选取时产生的人为误差,利用一种更为优越的多样本均值法对影像进行处理(刘蓉蓉等,2006),取得了较好的效果。为研究区域中成矿指数的一致性提取与评价及对地浸砂岩铀矿成矿的准确分析奠定了良好基础。

经过了一系列对遥感图像的大气辐射校正、辐射匹配、6景遥感图像的镶嵌步骤,得到预处理之后的完整图像(图2)。

3 光谱指数获取及三维地形分析

3.1 K-T变换获取光谱指数

K-T变换能直观地反映出植被覆盖和土壤在多光谱空间中的特征,所获取的光谱指数(C_{ap} 指数)有利于对地面反射情况、湿度和植被覆盖进行对比研究。在变换过程中,亮度、绿度和湿度分别作为3个数据轴:亮度分量能够反映出地面的反射蒸腾程度,绿度分量能够反映出绿色生物量的特征,湿度分量则表现为可见光-近红外(ETM1~4)波段与波长较长的红外(ETM5、7)波段的差值,而ETM5、7波

段为水分子的强吸收带,对湿度最为敏感,能够反映地面湿度特征。

借助于Erdas Imagine8.4分别提取了盆地的亮度、绿度、湿度3种指数图像,并将亮度赋予红色调,绿度赋予绿色调,湿度赋予蓝色调进行K-T变换的指数图像合成(图3);将绿度赋予绿色调,湿度赋予蓝色调进行绿度指数和湿度指数合成(图4)。

依图3观察,吐哈盆地内部与其周边山地相比较,亮度值(红色调)较高,反映出强烈的蒸腾作用;而绿度和湿度相对较低,呈现出干旱盆地的特点。

3.2 数字高程模型

利用数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model; 付晓等,2002)制作了研究区三维影像图(图5),进行宏观的、不同高度层次的、多方位的观察与地学分析。

3.3 吐哈盆地三维地貌的地学分析

吐哈盆地及其邻区为中、新生代盆岭构造区,最近一次山系的强烈隆升和盆地沉降以第三纪末尤为强烈。同时盆地成矿的主要目的层又是中下侏罗统的水西沟群及第三纪部分地层。因此自侏罗纪以来的地形起伏变化,对地浸砂岩铀矿的成矿有着直接的影响。

三维地形图整体展现出围绕盆缘周边为地势较高的一系列山脉。盆地北部为博格达山脉、巴里坤山脉,海拔高程约为4000余米,分水岭距盆地边界约30 km;南部山系为觉罗塔格山、天山山脉,海拔高程约为2000余米,分水岭距盆地边界约130 km。向盆内方向地势逐渐变低;其中位于盆地西部的吐鲁番坳陷又以鲁克沁附近地势最低,高度不大于50 m;小草湖-十三间房以南,高度介于300~500 m,而了墩以北,高度大于500 m。

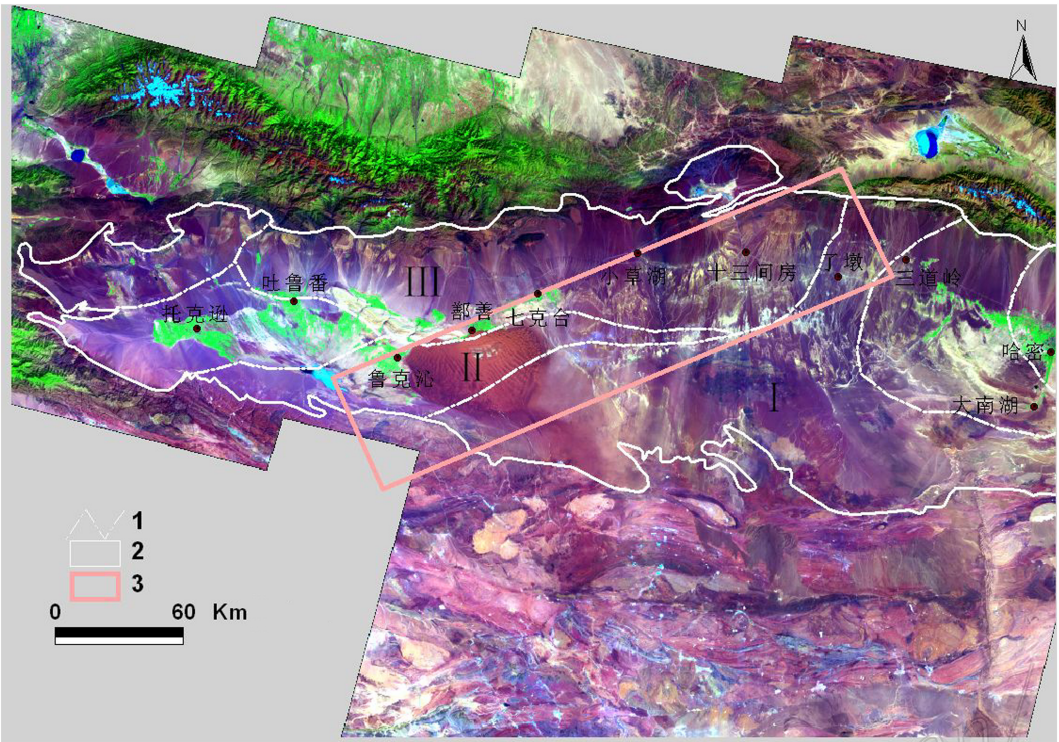


图2 吐哈盆地遥感图像(ETM741)

I—了墩隆起; II—艾丁湖斜坡; III—台北凹陷; 1—构造单元边界; 2—盆地边界; 3—研究区

Fig. 2 Remote sensing image of Turpan-Hami basin(ETM741)

I—Liaodun uplift; II—Aidinghu slope; III—Taibei depression; 1—Boundary of tectonic unit; 2—Boundary of basin; 3—Study area

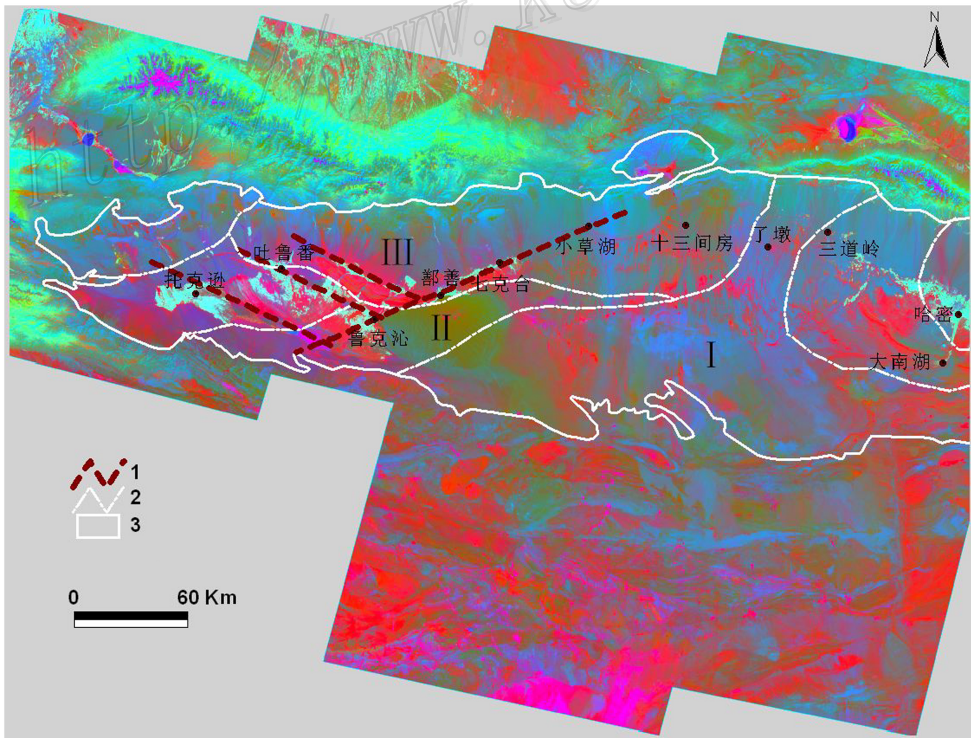


图3 了墩隆起西缘K-T变换图像

I—了墩隆起; II—艾丁湖斜坡; III—台北凹陷; 1—遥感目视解译断裂构造; 2—构造单元边界; 3—盆地边界

Fig. 3 K-T transformation image of the western margin of Liaodun uplift

I—Liaodun uplift; II—Aidinghu slope; III—Taibei depression; 1—Fault structure based on visual interpretation of remote sensing image; 2—Boundary of tectonic unit; 3—Boundary of basin

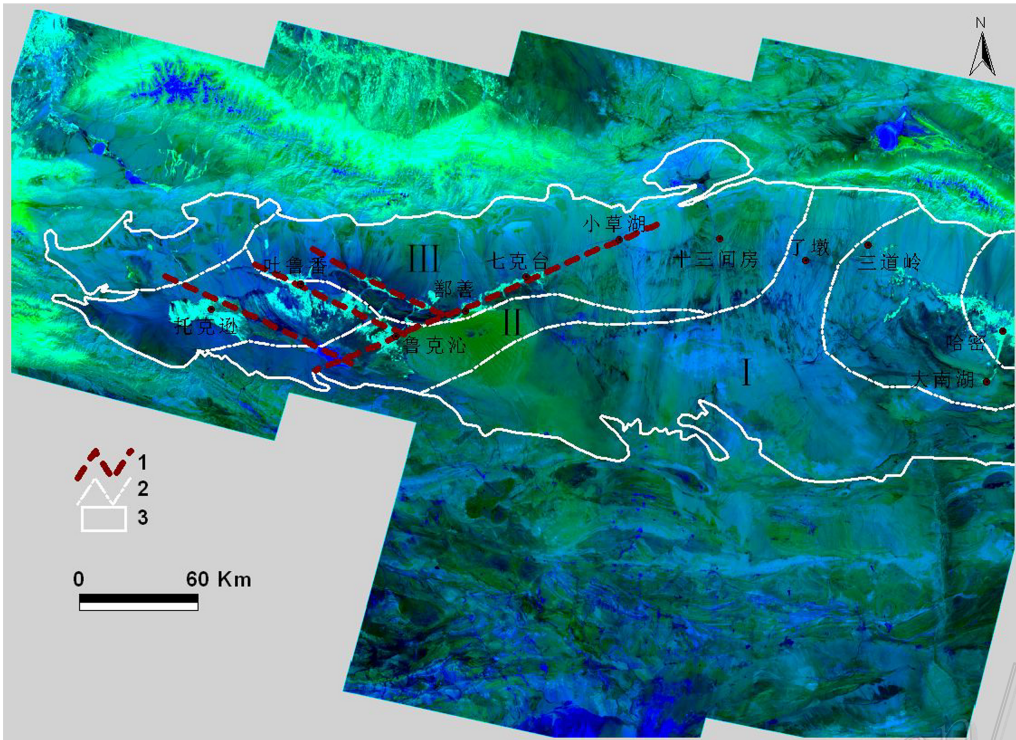


图4 绿度指数和湿度指数合成图

I—了墩隆起；II—艾丁湖斜坡；III—台北凹陷；1—遥感目视解译断裂构造；2—构造单元边界；3—盆地边界

Fig. 4 Combination image of greenness indices and wetness indices

I—Liaodun uplift; II—Aidinghu slope; III—Taibei depression; 1—Fault structure based on visual interpretation of remote sensing image; 2—Boundary of tectonic unit; 3—Boundary of basin

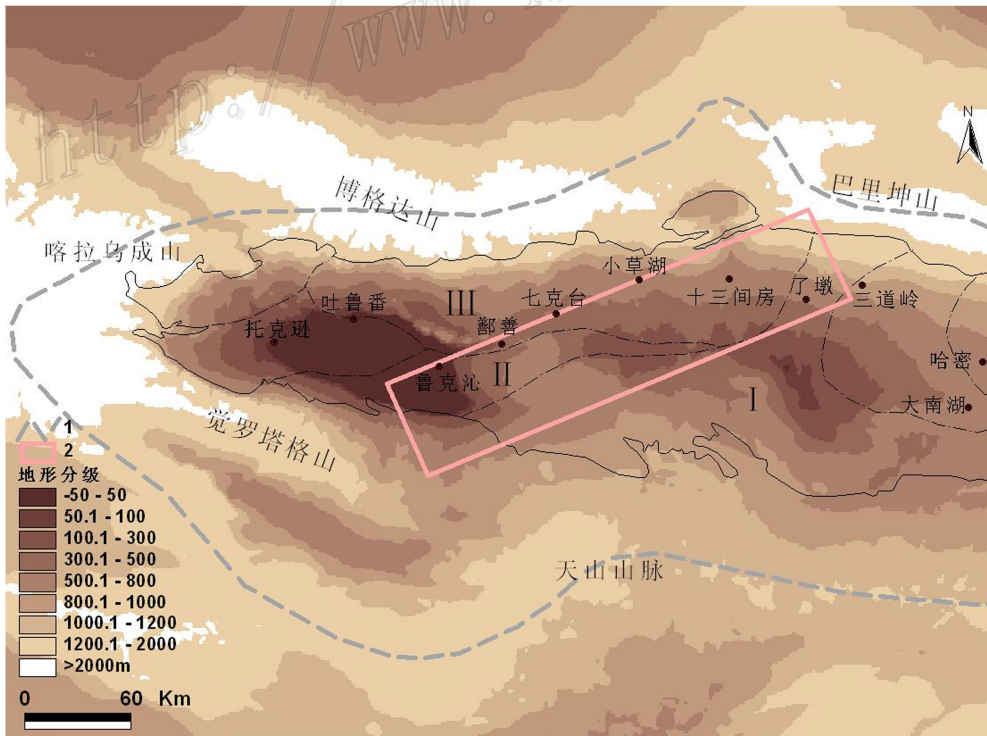


图5 吐哈盆地现代三维地形图

I—了墩隆起；II—艾丁湖斜坡；III—台北凹陷；1—分水岭；2—研究区

Fig. 5 Modern 3D relief map of Turpan-Hami basin

I—Liaodun uplift; II—Aidinghu slope; III—Taibei depression; 1—Watershed; 2—Study area

从盆地的构造演化特征来看,侏罗纪盆地以西北缘的喀拉乌成山隆升为主;白垩纪—早第三纪盆地以均衡沉降为主,也就是说盆地内地形高差没有太大的变化。晚第三纪—第四纪主要是天山和博格达山隆升幅度加大,中间了墩隆起以南及觉罗塔格山北麓相继沉降。侏罗纪构造作用对盆地地形高差的影响主要集中在盆地的西北缘,而对处于盆地中西部的研究区地形高差影响则很小。第三纪末,受喜马拉雅运动的影响,了墩隆起以南及觉罗塔格山北麓相继沉降。

结合现代地形分析与盆地构造演化特点,可以对铀矿有利成矿期侏罗纪晚期—第三纪末的地形特点进行反演。与研究区密切相关的了墩隆起以南及盆地西南部觉罗塔格山北麓的地形高度至少要高于现代;研究区南侧的天山山脉则是准格尔板块与塔里木板块之间的晚古生代造山带,且在晚第三纪—第四纪又发生了隆升运动,可见在成矿期间天山山脉是存在的,并在后期有进一步抬升,而研究区北缘相邻的博格达山和巴里坤山在侏罗纪—第四纪也明显高于盆内。盆地的三维地形图能较为直观地显现出成矿期间研究区、南、北部相邻近山系及了墩隆起之间大致的地形高度(图5)。

4 研究区三维地形及水动力条件

地浸砂岩型铀矿主要产于渗入型自流水盆地。在这类盆地中必须存在铀矿赋存与富集所必需而且要相对完整的赋矿地层层间承压水的补给、径流及排泄系统。补给区主要是盆地周缘的中低山系,以大气降水、冰、雪融水及基岩裂隙水的形式补给,并通过断裂构造或出露的透水层流入地下;排泄区则一般分布于盆地低洼地区;位于补给区和排泄区之间的就是径流区。因此,一旦确定了研究区的补-径-排区域,就可以在宏观尺度上对研究区内成矿的水动力环境进行深入分析和研究。

(1) 补给区的确定

经过指数变换的合成图像(图3)能够较为清晰地反映出吐哈盆地的地表情况:盆地内部具有较强的反射率,而盆地周边山地蚀源补给区则相对较低。如图3中鲁克沁-鄯善附近明亮的红色调,就反映出该处地表具有很强的反射值,地表蒸腾作用强烈。利用K-T变换后的亮度指数并结合研究区附近的三维地形图,可以确定补给区的范围。位于盆地中西

部的研究区,西南方的觉罗塔格山、南侧的天山山脉、东北部的巴里坤山都可视为铀成矿期间承压水的南、北补给区域。

而盆内了墩隆起由于形成时间较早、发育历史长,在盆地发展的大部分时期处于抬升背景(张鹏飞等,1997)。它的产生分隔了吐哈盆地东、西2拗陷,也直接改变了以往自流水盆地单一的水动力环境——补给区主要是盆地周缘的中低山系,使盆地在铀成矿期间的水流补给区域内部增加了相对明显凸起的了墩隆起。因此,研究区内的较低地势部位也可同时接受来自了墩隆起的水流补给。由于长期存在,隆起将盆地划分成左、右2个相对独立的水动力循环系统,这对以水成铀矿理论为指导,圈定地浸砂岩型铀矿大致成矿范围来说也是非常重要的。

(2) 排泄区的确定

和浅表地下水(潜水)不同,与地浸砂岩型铀矿成矿密切相关的深部地下水(层间承压水)需要通过断裂构造或次级隆起的边缘排泄,不一定恰好位于地貌的最低处。而在强烈蒸腾的荒漠化地区,地下水的排泄有时具有一定的隐蔽性,但是植被及对湿度敏感的红外光谱却可以有效地成为排泄区识别的定量指标。因此,可利用K-T变换中的绿度和湿度指数对排泄构造进行识别和分析,当这些指数较高且成带状分布时,则指示有排泄构造的存在。观察绿度、湿度指数合成(图4)并通过遥感解译发现,图中鲁克沁附近有较为明显且具代表性的3条NWW走向、1条NEE走向(沿鲁克沁-小草湖)的、在空间上呈线性展布的高绿度、湿度值异常带。这反映出此处存在着断裂排泄构造,即在鲁克沁-七克台附近,就为现代承压水的主要排泄区域。

尽管三维地形图显示出鲁克沁附近长期处于盆地较低地势,同时又是现代承压水的主要排泄区域,但在成矿期间排泄区域是否也与之相同,这还需进一步的确定。只有成矿期间排泄断裂的存在位置、切穿地层深度和活动时间等才是与铀成矿密切相关的,而现代排泄区域则可作为具体成矿排泄区划定方向的参考。

据地震剖面、航磁和重力资料显示(吴涛等,1997)吐哈盆地发育数百条逆冲或逆掩断层,其中对沉积、凹陷、构造带与局部构造形成有控制作用的各种断层约计207条。断裂呈带状展布,按断层切割深度可分为基底断裂和盖层断裂两类。基底断裂约有43条,主要分布在盆地南部与盆缘;盖层断裂

约有164条,其分布较广。

将现代承压水主要排泄区域作为参考,叠合吐哈盆地盖层断裂分布图,在众多盖层断裂中挑选出5条与研究区关系较为密切的、具代表性的大型断裂构造:火焰山断裂、马红断裂、七克台断裂、红台断裂和小草湖断裂。

依托盆地地质情况,结合断裂的活动演化史(袁明生等,2002),表明火焰山断裂自中石炭世以来一直存在,且成矿期处于活动状态,断裂切穿了侏罗系—新近系地层;七克台断裂带(七克台断裂中段)则主要切穿下侏罗统—白垩系地层,自早侏罗世以来具有多期活动的特点。凭借以上特点,虽然断裂切穿盖层程度与活动期不尽相同,但总体上,鲁克沁至七克台一带可作为研究区地浸砂岩型铀矿成矿地层承压水的主要排泄区域。而红台断裂活动和切穿地层具有较长的间断性,因而不利于成矿地层水动力系统的有效循环。

(3) 径流区的确定

当确定了研究区铀成矿期间承压水的补给及排泄范围后,位于它们之间的就是径流区。由南向北的承压水主要循环系统以及南北相隔较远的补给、排泄区,使得研究区鲁克沁—七克台以南的径流较长、流域广泛。

(4) 研究区内地浸砂岩型铀矿的水动力条件

经过分析,确定了研究区成矿期间承压水的补给、径流和排泄区域。承压水的循环系统可作如下表述:研究区西南方的觉罗塔格山、南侧的天山山脉范围广阔,是承压水的主要补给区域。在地形的影响下,补给区的大气降水等从山、盆交界处的山前—盆缘断裂或出露地表的透水层等注入地层,由南向北流经区内南部、东南部大面积的径流流域,最后在鲁克沁—七克台附近的成矿排泄区排出地表,从而完成循环(图6)。

另外,盆地中部的了墩隆起、东北部的巴里坤山因地势较高,对研究区给予了一定的水流补给。

5 结论

通过对遥感影像的信息处理,能清晰、直接、快速地反映出大范围裸露地表的实际情况和地形特点,使在前期找矿工作中可以有的放矢的进行重点区域研究,这不仅为找矿工作带来便利,节省了时间,而且也为后期研究提供了某些有利判据。本次

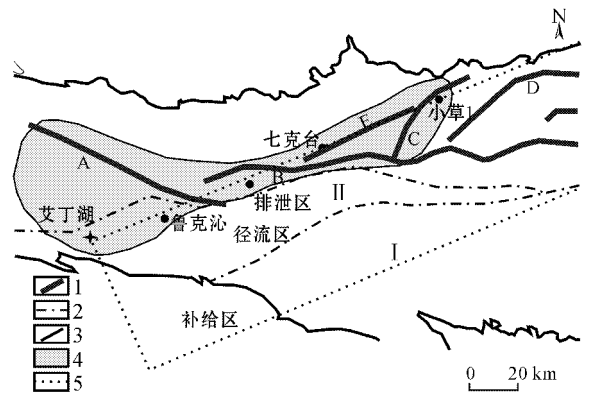


图6 研究区成矿承压水的主要排泄区域图

A—火焰山断裂;B—七克台断裂;C—小草湖断裂;D—红台断裂;E—马红断裂;I—了墩隆起;II—艾丁湖斜坡;1—部分盖层断裂;2—构造单元边界;3—盆地边界;4—成矿承压水主要排泄区;5—研究区

Fig. 6 Main discharge district of ore-forming confined water in the study area

A—Huoyanshan fault; B—Qiketai fault; C—Xiaocaoahu fault; D—Hongtai fault; E—Mahong fault; I—Liaodun uplift; II—Aidinghu slope; 1—Some faults in cover bed; 2—Boundary of tectonic unit; 3—Boundary of basin; 4—Main discharge district of ore-forming confined water; 5—Study area

研究取得的主要成果如下:

(1) 运用自行研制的多样本均值辐射匹配方法对吐哈盆地6景ETM数据影像进行处理,减小了人为误差,取得了较好的效果。这有助于研究区域中光谱指数的一致性提取与评价,也对后期地浸砂岩铀矿成矿、找矿要素的准确分析起到积极作用。

(2) 采用“以今论古”的反推方式。即利用对现代遥感影像的信息处理与分析,肯定了现代承压水的排泄区域,并结合相关地学资料,进而分析出成矿期间研究区的水动力环境,划分了补给区、径流区和排泄区的范围,为该区找矿研究工作提供了重要的遥感判据。

(3) 展示了一种较为新颖的遥感识别构造方式,从一定程度上拓展了识别构造的有效方法,即利用K-T变换中的绿度和湿度指数。当这些指数较高且成带状分布时,则指示有构造的存在。

(4) 利用吐哈盆地现代三维地形图,并结合盆地常规地质研究成果,反演出成矿期间研究区及其周围的地形,具有直观性。

References

Fu X and Zhou W. 2002. Application of digital elevation model in forest management[J]. Guangxi Forestry Science, 31(1):12-13 in Chi-

- nese).
- He J G, Dong X Z, Guo M R, Liu D C, Zhu M Q, Lu Y X, Wu J H and Huang S T. 2000. Application research of fusion images of TM and airborne γ -spectra data on the metallogenetic control factors in Xiazhuang uranium orefield [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 6(2):24-30 (in Chinese).
- Huang X F and Tian H. 1994. The application of remote sensing technique to metallo-genetic prognosis in the the covered area [J]. China Nuclear Science and Technology Report, 47(1):39-40 (in Chinese).
- Liu D C, Zou J K, Sun M R and Wang G J. 1989. Digital Image integration technique of multiple geoscience information system and its application on Shengyuan basin [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 7(2):29-37 (in Chinese).
- Liu R R, Li S and Huang M H. 2006. Radiometric matching methods to the adjacent remote sensing images in Turpan-Hami Basin [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 29(1):90-94 (in Chinese).
- Wang B Q. 2000. Analysis on metallogenetic conditions of prospect prognosis for interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposit in Turpan-Hami Basin [J]. Uranium Geology, 16(6):321-326 (in Chinese).
- Wu B L, Quan Z G, Wei G H, Peng X J, Wang J P, Li Z Y, Xu G Z, Liu C Y and Zhang F X. 2005. Basic geological and geocharacteristics of sandstone type uranium deposits in southwestern margin of Turpan-Hami Basin [J]. Mineral Deposits, 24(1):34-43 (in Chinese with English abstract).
- Wu T and Zhao W Z. 1997. Formation and distribution of coal measure-derived hydrocarbon accumulation in Turpan-Hami Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 83-84 (in Chinese).
- Yuan M S, Liang S J, Yan L C, et al. 2002. Petroleum geology and exploration in Turpan-Hami Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 18-53 (in Chinese).
- Zhang P F, Jin K L, Wu T, et al. 1997. Coal-bearing deposits and coal-formed oil in Turpan-Hami Basin [M]. Beijing: China Coal Industry Pub. House. 99-134 (in Chinese).

附中文参考文献

- 付晓, 周维. 2002. 数字高程模型及其在森林资源调查中的应用 [J]. 广西林业科学, 31(1):12-13.
- 何建国, 董秀珍, 郭敏茹, 刘德长, 祝民强, 卢映新, 吴金辉, 黄树桃. 2000. 下庄铀矿田控矿因素光-能谱融合图像解译应用研究 [J]. 国土资源遥感, 12(2):24-30.
- 黄贤芳, 田华. 1994. 遥感技术在覆盖区成矿预测中的应用 [J]. 中国核科技报告, 47(1):39-40.
- 刘德长, 邹景珂, 孙茂荣, 王国娟. 1989. 多源地学信息数字图像综合技术及在盛源盆地的应用研究 [J]. 国土资源遥感, 7(2):29-37.
- 刘蓉蓉, 李社, 黄美化. 2006. 对吐哈盆地相邻两幅遥感图像的辐射匹配 [J]. 测绘与空间地理信息, 29(1):90-94.
- 王保群. 2000. 吐哈盆地层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件分析及远景预测 [J]. 铀矿地质, 16(6):321-326.
- 吴伯林, 权志高, 魏现辉, 彭新建, 王金平, 李占游, 徐高中, 刘池阳, 张复新. 2005. 吐哈盆地西南缘砂岩型铀矿地质地球化学基本特征 [J]. 矿床地质, 24(1):34-43.
- 吴涛, 赵文智. 1997. 吐哈盆地煤系油气田形成和分布 [M]. 北京: 石油工业出版社. 83-84.
- 袁明生, 梁世君, 燕列灿, 等. 2002. 吐哈盆地油气地质与勘探实践 [M]. 北京: 石油工业出版社. 18-530.
- 张鹏飞, 金奎励, 吴涛, 等. 1997. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油 [M]. 北京: 煤炭工业出版社. 99-134.